

УДК 629.429.3:621.313

О.М. Петренко<sup>1</sup>, Б.Г. Любарський<sup>2</sup>, М.Л. Глебова<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТРАМВАЙНИХ ВАГОНІВ

В статті розроблено методику визначення теплового стану елементів конструкції асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону на підставі еквівалентної теплової схеми заміщення. За результатами моделювання нагріву та охолодження тягового двигуна АД 931 для трамвайного вагону встановлено, що лобова частина обмотки статора, яка має найбільше температурне навантаження може нагрітися до сталого перегрівання 134,67 °С в режимі однократної широтно-імпульсної модуляції та 96,64 °С в режимі просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції.

**Ключові слова:** трамвайний вагон, еквівалентна тепла схема заміщення, тяговий асинхронний двигун, перегрівання над температурою охолоджувального середовища, широтно-імпульсній модуляції.

### Вступ

**Вступ.** На сучасних трамвайних вагонів в тяговий привід все частіше створюється на основі асинхронних тягових двигунів (АТД) зі ступенем захисту IP44 та IP54. В таких двигунах застосовуються двоконтурна система самовентиляції до якої входить вентилятор, що безпосередньо встановлений на свobodному кінці валу двигуна та забезпечує потік повітря який охолоджує станину двигуна, а також внутрішній вентилятор, що забезпечує внутрішню циркуляцію внутрішнього повітря.

**Аналіз останніх досліджень.** Тепловий стан елементів конструкції АТД трамваю залежать від комплексу факторів таких як: ваги потягу; профілю шляху, графіку руху, кліматичних явищ, режимів роботи системи керування тяговим приводом, системи електропостачання та інші [1-6]. Теплові процеси у тягових двигунах характеризуються великими значеннями постійної часу, що може становити 10..30 хв. [1 – 6]. Нагрів двигуна до постійної температури може тривати 35...100 хв. [1 – 6]. В роботах [1, 2] відмічається, що електромеханічні процеси при русі електрорухомого складу більш динамічні. Режим роботи тягового приводу може змінюватися кілька разів за одну хвилину. Таким чином для контролю теплового стану двигуна необхідно визначення найбільш теплонапружених елементів конструкції двигуна за весь час його роботи.

**Мета статті:** розробка методики визначення теплового стану елементів конструкції асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону на підставі еквівалентної теплової схеми заміщення.

### Результати досліджень

У основі математичної моделі нагріву двигуна лежить основний закон теплопровідності [7-10], сформульований Фур'є у результаті аналізу експе-

риментальних даних. Цей закон встановлює кількісний зв'язок між тепловим потоком і різницею температур в двох точках тіла: кількість переданої теплоти пропорційна градієнту температури, часу і площі перерізу  $F$ , перпендикулярному до напрямку поширення теплоти. Якщо кількість переданої теплоти віднести до одиниці часу, то сформульована залежність виразиться таким чином

$$p = -\lambda F \text{ grad } \theta, \quad (1)$$

де  $p$  – кількість переданої теплоти, віднесена до одиниці часу, тобто потужність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $F$  – площа перерізу, перпендикулярного до напрямку поширення теплоти;  $\theta$  – температура точок тіла.

Для вирішення рівняння (1) в роботах [7,8,10] запропоновано наступне. Ввести припущення.

– тіло має необмежену теплопровідність, що призводить до відсутності градієнта температури по будь-якому напрямку в його об'ємі;

– температура доквілля  $\theta_c$  незмінна, тобто доквілля має необмежену теплоємність;

– коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  між поверхнею машини і доквіллям не залежить від місця і тривалості протікання процесу.

Та перетворити рівняння теплового балансу (1) до вигляду

$$\Delta P = C \frac{d\theta}{dt} + A (\theta - \theta_c), \quad (2)$$

де  $C = c \cdot G$  – теплоємність тіла;  $A = \alpha \cdot F$  – коефіцієнт тепловіддачі тіла.

В роботі [11] пропонується універсальна еквівалентна тепла схема (ЕТС), що дозволяє виконувати теплові розрахунки нестационарних режимів роботи АТД за різних систем охолодження. Розглянуто використання універсальної теплової схеми для теплових розрахунків асинхронних двигунів регульованих електроприводів.

Нагрів АТД залежить від режиму його роботи і величини навантаження. На нагрів АТД впливають співвідношення тривалості періодів роботи (режим тяги, гальмування або підтримання заданої швидкості руху) і пауз (режим вибігу або механічного, пневматичного гальмування) між ними або періодів роботи з повним і частковим навантаженням, характер протікання перехідних процесів.

У тяговому електроприводі двигуни найчастіше працюють в режимі, що перемежається. Цикл включає періоди роботи поперемінно на різних частотах обертання з різними режимами роботи автономного інвертора напруги (АІН), що забезпечує його живлення, і періоди переходів від одних частот обертання до інших. При перехідних процесах від однієї частоти обертання, що встановилася, до іншої збільшуються втрати, що впливає на зростання температур конструктивних елементів. Характер протікання перехідних процесів залежить від коефіцієнта інерції, визначуваного як відношення суми моменту інерції ротора і приведенного до валу двигуна моменту інерції усього поїзду до моменту інерції ротора з урахуванням кількості тягових двигунів. Окрім цього, режим тяги характеризується відносною (у відсотках до тривалості циклу) тривалістю навантаження на кожній з частот обертання. Аналіз температур конструктивних елементів АТД з АІН, зокрема найбільш важливого елементу – обмотки статора, повинний виконуватися з урахуванням роботи двигуна в заданому режимі.

Таким чином для визначення теплового стану АТД у кожному з режимів роботи необхідно визначитися скласти систему рівнянь для кожного з тіл з конструкції АТД. Кількість та вид рівнянь залежить від конструктивних особливостей системи обходження двигуна.

Тяговий електропривод відрізняються типами напівпровідникових перетворювачів, видами регулювання і законами управління, використовуваними в них. Двигуни таких приводів можуть мати як різні виконання, так і різні конструкції систем охолодження. Тому має бути передбачена можливість враховувати при теплових розрахунках як в режимах, що встановилися, так і в перехідних, усю різноманітність конструктивних рішень систем охолодження АТД. Найбільш ефективним для таких розрахунків видається метод еквівалентних теплових схем заміщення [11,12]. Універсальна ЕТС (рис. 1) АТД дає можливість вести нестационарні теплові розрахунки в двигунах закритого (IP44, IP54) і захищеного (IP22, IP23) виконань як з примусовим, так і з самоохолодженням, а також з використанням в системі вентиляції аксіальних і радіальних вентиляційних каналів.

У ЕТС для теплових розрахунків нестационарних режимів, складеній на підставі універсальної

еквівалентної теплової схеми заміщення АТД для стаціонарних теплових розрахунків [13], враховується те, що конструктивні елементи електричної машини мають визначені теплоємності  $C_i$ , значення яких залежать від використовуваних матеріалів і їх геометричних розмірів.

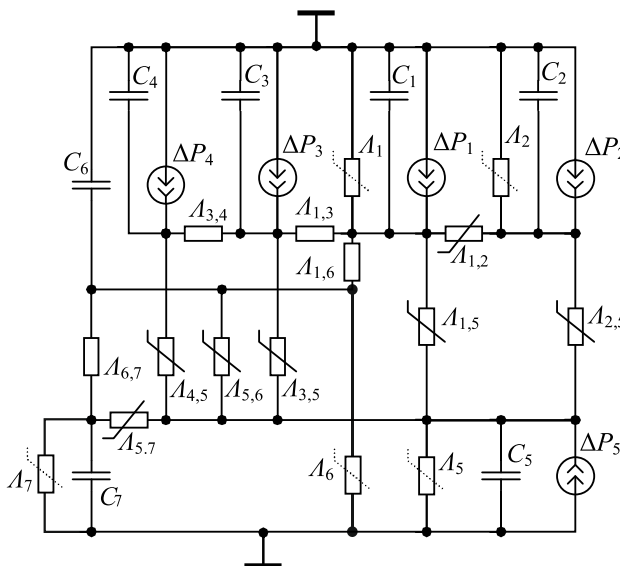


Рис. 1. Універсальна еквівалентна теплова схема заміщення АТД для аналізу несталих теплових процесів

При перехідних процесах деяка теплова провідність між конструктивними елементами АТД при регулюванні частоти обертання змінюється. Така провідність зображена на схемі як змінні. Провідність, зображена як змінні пунктиром, змінюється при самоохолодженні та залишається незмінними при обдуванні незалежним вентилятором.

При рішенні задачі визначення перевищення температур різних конструктивних частин електричної машини над температурою довкілля в дану еквівалентну схему заміщення включені наступні конструктивні частини АТД:

1. Сердечник статора (зубці і спинка) з середньою температурою перегрівання  $\theta_1$ , теплоємністю  $C_1$  і потужністю тепловиділення  $\Delta P_1$  (магнітними втратами в сердечнику з урахуванням додаткових втрат в сталі статора).
2. Короткозамкнена клітка ротора і зубці ротора з середньою температурою перегрівання  $\theta_2$ , теплоємністю  $C_2$  і потужністю тепловиділення (сума усіх втрат основних і додаткових в стержнях ротора, короткозамкнених кільцях і в магнітній системі ротора).
3. Пазова частина обмотки статора з середньою температурою перегрівання  $\theta_3$ , теплоємністю  $C_3$  і потужністю тепловиділення  $\Delta P_3$ .
4. Лобові частини обмотки статора з середньою температурою нагріву  $\theta_4$ , теплоємністю  $C_4$  і потужністю тепловиділення  $\Delta P_4$ .

5. Внутрішнє повітря (ВП) з середньою температурою  $\theta_5$ , теплоємністю  $C_5$  і потужністю тепловиділення  $\Delta P_5$ , обумовленою внутрішніми вентиляційними втратами.

6. Станина з середньою температурою перегрівання  $\theta_6$ , теплоємністю  $C_6$ .

7. Підшипникові щити з середньою температурою  $\theta_7$ , теплоємністю  $C_7$ .

У ЕТС АТД (рис.1) представлена наступна теплова провідність:

$\Lambda_1$  – провідність між пакетом статора і охолоджувальним середовищем (при безкорпусному виконанні).

$\Lambda_{1,2}$  – провідність повітряного проміжку між сердечником статора і ротором.

$\Lambda_{1,3}$  – провідність ізоляції пазової частини обмотки від міді обмотки до сердечника статора.

$\Lambda_{1,5} = \Lambda_{ркс} + \Lambda_{акс} + \Lambda_{пов}$  – провідність від пакету статора до ВП, складається з провідностей:  $\Lambda_{ркс}$  – від радіальних вентиляційних каналів статора,  $\Lambda_{акс}$  – від аксіальних вентиляційних каналів статора,  $\Lambda_{пов}$  – від поверхні сердечника статора до ВП.

$\Lambda_{1,6}$  – провідність від пакету статора до станини (для закритих АТД).

$\Lambda_2$  – провідність від ротора до повітря, що охолоджує (через аксіальні канали при пакеті ротора, що продувається).

$\Lambda_{2,5} = \Lambda_{л2} + \Lambda_{ркр} + \Lambda_{акр} + \Lambda_{вал}$  – провідність від активної зони ротора до внутрішнього повітря, складається з провідностей:  $\Lambda_{л2}$  – провідність від лобових частин білячої клітини до ВП,  $\Lambda_{ркр}$  – від радіальних вентиляційних каналів ротора,  $\Lambda_{акр}$  – від аксіальних вентиляційних каналів ротора до ВП та  $\Lambda_{вал}$  – провідність через вал до ВП.

$\Lambda_{3,4}$  – провідність обмотки статора в аксіальному напрямі.

$\Lambda_{3,5}$  – провідність від пазової частини обмотки статора до ВП через радіальні вентиляційні канали статора.

$\Lambda_{4,5}$  – провідність від лобових частин обмотки статора, що обдуваються, до ВП.

$\Lambda_5$  – умовна провідність, що враховує підігрівання охолоджувального повітря усередині АД (для двигунів захищеного виконання).

$\Lambda_{5,6}$  – провідність від ВП до станини.

$\Lambda_{5,7}$  – провідність від ВП до підшипникових щитів.

$\Lambda_{6,7}$  – провідність між станиною і підшипниковими щитами.

$\Lambda_6$  – провідність від поверхні станини, що обдувається, до охолоджувального повітря.

$\Lambda_7$  – провідність від підшипникових щитів до охолоджувального повітря.

Належність або відсутність провідностей у узагальненої ЕТС визначається за табл. 1.

Таким чином для IP44, IP54 універсальну ЕТС можна представити у виді, показаному на рис. 2.

Таблиця 1

Склад теплової провідності при різних системах охолодження

Виконання	IP44, IP54		
	IC0141	IC0151	IC0161
$\Lambda_{1,2}$	+	+	+
$\Lambda_{1,3}$	+	+	+
$\Lambda_{1,6}$	+	+	+
$\Lambda_1$	-	-	+
$\Lambda_{л1}$	+	+	+
$\Lambda_{ркс}$	-	-	-
$\Lambda_{акс}$	-	-	+
$\Lambda_{пов}$	-	-	-
$\Lambda_{3,4}$	+	+	+
$\Lambda_{3,5}$	-	-	-
$\Lambda_{л1}$	+	+	+
$\Lambda_{л2}$	+	+	+
$\Lambda_{вал}$	+	-	+
$\Lambda_{ркр}$	-	-	-
$\Lambda_{акр}$	-	-	+
$\Lambda_{пр}$	-	+	-
$\Lambda_{5,6}$	+	+	+
$\Lambda_{5,7}$	+	+	+
$\Lambda_в$	-	-	-
$\Lambda_{6,7}$	+	+	+
$\Lambda_{щц}$	+	+	+
$\Lambda_с$	+	+	+
$\Lambda_{щц}$	+	+	+

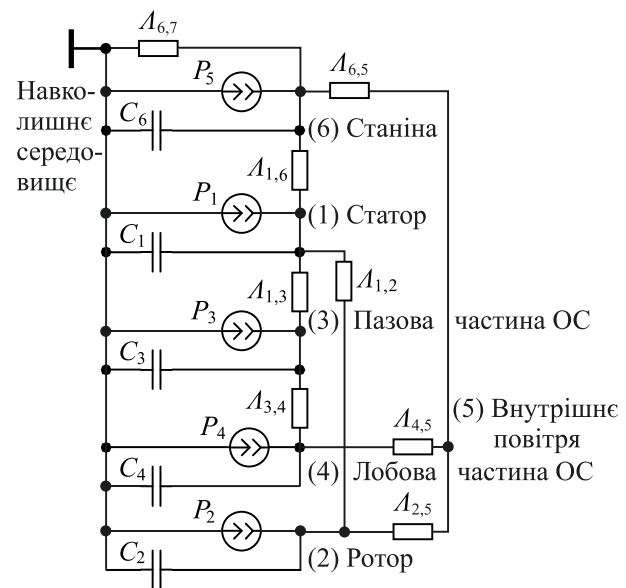


Рис. 2. ЕТС для АТД з ступенем захисту IP44, IP54

Так само, як і для стаціонарних теплових розрахунків [11], універсальна ЕТС перетвориться для тієї або іншої схеми охолодження шляхом виключення або зміни різних гілок і елементів. У таблиці представлені варіанти зміни складу теплових провідностей ЕТС при різних конфігураціях систем охолодження і виконань АТД.

Для розрахунку ЕТС пропонується використати метод вузлових потенціалів для електричних кіл. На його підставі для запропонованої універсальної ЕТС може бути складена система диферен-

ціальних рівнянь теплового балансу. У матричному виді система представляється виразом

$$\frac{d}{dt}u = [C]^{-1} \cdot [DP + L \times u] \quad (3)$$

де  $u$  – матриці-стовпці середніх перегрівань над температурою охолоджувального середовища у відповідних конструктивних елементах електричної машини,

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$C$  – матриця теплоємностей відповідних конструктивних елементів, на які умовно розбивається АД,

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$DP$  – матриця-стовпець потужностей тепловиділення у відповідних конструктивних елементах АД,

$$DP = \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \vdots \\ DP_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Величини потужностей тепловиділення розраховуються при аналізі режимів роботи, що встановилися, або нестационарних, за даними втрат в елементах машини,  $L$  – матриця теплових провідностей

$$L = \begin{bmatrix} -L_{1,1} & L_{1,2} & \dots & L_{1,n} \\ L_{2,1} & -L_{2,2} & \dots & L_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n,1} & L_{n,2} & \dots & -L_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $L_{1,2}$   $L_{1,3}$  ...,  $L_{n,n}$  – теплова провідність між елементами двигуна.

Матриці потужностей тепловиділення  $DP$  та провідностей  $L$  складаються на основі метода вузлових потенціалів для електричних кіл:

$$L_{n,n} = \sum_k \Lambda_{k,n}, \quad (8)$$

$$L_{n,m} = L_{m,n} = \Lambda_{n,m}. \quad (9)$$

Вирішення цієї системи першого порядку, методом Рунге-Кутта, дозволяє розглянути зміну температур конструктивних елементів АД при перехідних процесах. Адекватність математичної моделі істотно підвищується при врахуванні змін на кожному кроці інтегрування як втрат (у тому числі від усіх вищих гармонік, що враховуються), так і теплової провідності.

Моделювання режимів проводилось на прикладі АД 931 виробництва ДП завод «Електроважмаш» з зовнішньою системою охолодження та ступенем захисту IP 54. Основні технічні характеристики якого приведено у [14]. Моделювання

проводилось в режимі нагріву двигуна до здійснюється за  $2 \cdot 10^4$  с та його охолодження за такий самий час. Живлення здійснювалося як в режимі однократної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) так і при застосуванні просторово-векторної ШІМ. Режим роботи двигуна номінальний. Результати моделювання сталого режиму роботи штатної само вентиляції АД 931 наведені на рис. 3 та 4.

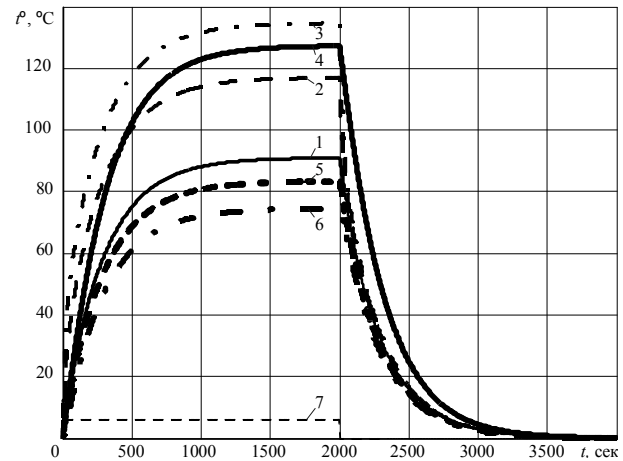


Рис. 3. Перегрівання елементів конструкції АД 931 в залежності від часу роботи при зовнішній вентиляції та живленні від напівпровідникового перетворювача, що працює в режимі однократної ШІМ. 1 – осердя статора, 2 – пазова частина обмотки статора, 3 – лобова частина обмотки статора, 4 – ротор, 5 – ВП, 6 – станина, 7 – навантаження

Слід зазначити, що при моделюванні знаходилися перевищення температур над температурою навколишнього середовища, тому для визначення реальних значень температури необхідно додавання до них температури навколишнього середовища.

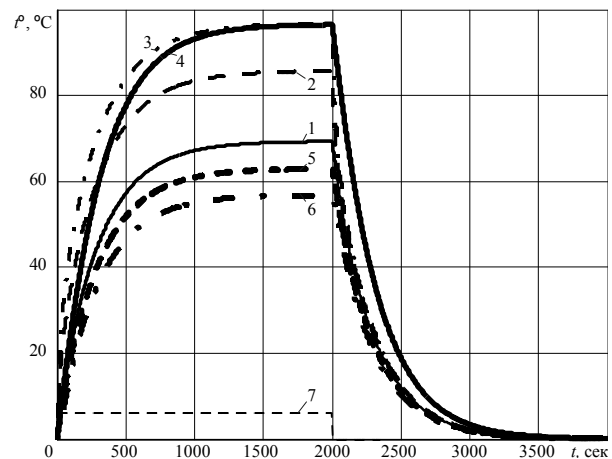


Рис. 4. Перегрівання елементів конструкції АД 931 в залежності від часу роботи при зовнішній вентиляції та живленні від напівпровідникового перетворювача, що працює в режимі просторово-векторної ШІМ. 1 – осердя статора, 2 – пазова частина обмотки статора, 3 – лобова частина обмотки статора, 4 – ротор, 5 – ВП, 6 – станина, 7 – навантаження

За результатами моделювання теплових режимів визначено наступне. Так лобова частина обмотки статора, яка має найбільше температурне навантаження може нагрітися до сталого перегрівання 134,67°C (рис. 3) в режимі однократної ШІМ (рис. 4) та 96,64 °C в режимі просторово-векторної ШІМ. Перегрівання ротора досягає 127, 3 °C (рис. 3) в режимі та однократної ШІМ та 96,47°C в режимі просторово-векторної ШІМ (рис. 3 та 4). Цей факт обумовлено неможливістю безпосереднього підводу охолоджуючої речовини (повітря) до джерел втрат – активних елементів АТД (ротору та статору). Постійні часу нагріву складають 560..580 с. Більшу постійну часу має ротор АТД.

## Висновки

Розроблено методику визначення теплового стану елементів конструкції асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону на підставі еквівалентної теплової схеми заміщення. За результатами моделювання нагріву та охолодження тягового двигуна АД 931 для трамвайного вагону встановлено, що лобова частина обмотки статора, яка має найбільше температурне навантаження може нагрітися до сталого перегрівання 134,67 °C в режимі однократної ШІМ та 96,64 °C в режимі просторово-векторної ШІМ. Перегрівання ротора досягає величини 127, 3 °C в режимі однократної ШІМ та 96,47°C в режимі просторово-векторної ШІМ. Постійні часу нагріву складають 560..580с. Більшу постійну часу має ротор АТД.

## Список літератури

1. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація ... д-ра технічних наук за спеціальністю 05.22.09. - «Електротранспорт». НТУ «ХП». Харків, - 2014. – 368 с.
2. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств желез-

нодорожного транспорта [Текст]: моногр. / Г.К. Гетьман. – Днепр, 2008. – 444 с.

3. Мокін О.Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом : моногр. / О.Б. Мокін, Б.І. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 192 с.

4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. - X.: НТМТ, 2013. - 248 с.

5. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. № 6 – С. 8-13.

6. Todorov, Emanuel. "Optimal control theory." Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding (2006): 269-298.

7. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – М.: ГЭИ, 1949. – 562 с.

8. Борисенко А.И., Костииков А.И., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

9. Исаченко В.П., Оситова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 346 с.

10. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.

11. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Расчет температур конструктивных элементов асинхронных двигателей в динамических режимах // Вісник НУ «Львівська політехніка», – 2000. – № 403. – С. 145 – 149.

12. Коваль-Лесков А.В. Тепловые процессы в асинхронном электродвигателе при работе в перемежающемся режиме // Электромашиностроение та електрообладнання.– 1997. – Вып 49. – С. 68 – 73.

13. Петрушин В.С., Якимец А.М. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей // Электромашинобуд. та електрообл.– Вып. 59.– 2002.– С. 75-79.

14. БИЛЛ.652414.001ПС. Электродвигатель асинхронный тяговый типа АД914У2 [Паспорт] – X.: ГП «завод Электротяжмаш», 2010 – 72 с.

Надійшла до редколегії 18.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет «ХП», Харків.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ

А.Н. Петренко, Б.Г. Любарский, М.Л. Глебова

В статье разработана методика определения теплового состояния элементов конструкции асинхронного тягового двигателя трамвайного вагона на основании эквивалентной тепловой схемы замещения. По результатам моделирования нагрева и охлаждения тягового двигателя АД 931 для трамвайного вагона установлено, что лобовая часть обмотки статора, которая имеет наибольшее температурную нагрузку может нагреться до устойчивого перегрева 134,67 °C в режиме однократной широтно-импульсной модуляции и 96,64 °C в режиме пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции.

**Ключевые слова:** трамвайный вагон, эквивалентная тепловая схема замещения, тяговый асинхронный двигатель, перегрев над температурой охлаждающей среды, широтно-импульсной модуляции.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL CONDITION OF TRACTION ASYNCHRONOUS MOTOR TRAW-MOTORS

O.M. Petrenko, B.G. Liubarskyi, M.L. Glebova

In the article the technique of definition of a thermal condition of elements of a design of the asynchronous draft engine of the tram car on the basis of an equivalent thermal scheme of replacement is developed. Based on the results of modeling the heating and cooling of the traction engine AD 931 for a tram car it is established that the frontal part of the stator winding that has the greatest temperature load can be heated to a stable overheat of 134.67 °C in the mode of single pulse width modulation and 96.64 °C in the space-vector pulse-width modulation mode.

**Keywords:** Tramcar, an equivalent thermal replacement circuit, a traction induction motor, overheating over the temperature of the cooling medium, pulse width modulation.